

层次分析法在苏州河河口水闸底板助浮方案选择中的应用

季永兴^{1,2}, 黄庐进², 唐国利³, 张义顺³

(1. 上海市水务工程设计研究院, 上海 200063; 2. 华东理工大学商学院, 上海 200237;

3. 上海市苏州河综合整治建设有限公司, 上海 200002)

摘要 简要介绍影响苏州河河口水闸工程闸底板浮运沉放的水文、波浪、水深、助浮、助航等施工条件, 以及拟定的助浮方案和助浮计算分析成果。在综合比较了各方案优缺点后提出利用层次分析法选择最优方案, 对拟定的方案建立递阶层次结构模型, 并引入合适的数值标度形成判断矩阵, 从浮运控制、沉放控制、结构影响、再浮可能性、吃水深度、水下割除、附加荷载、工程量、工期影响等 9 个方面分析影响, 得出所有方案的权重总排序, 并确定最优方案。

关键词 层次分析法 闸底板 助浮 苏州河河口水闸

中图分类号: TV66

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2007)S1-0036-04

苏州河河口水闸底板为一整块大型混凝土薄壳结构, 闸底板在外高桥造船基地船坞内预制完成后, 与闸门一起由拖船绑带经长江口、黄浦江浮运至工程现场, 然后就位、沉放, 搁置在闸墩上。由于闸底板的浮运沉放方案确定受水文潮汐条件、河口水深、助浮设施、拖带设施等方面的影响, 同时沉放就位又是工程成功与否的关键, 因此闸底板的浮运沉放方案选择成为设计与施工共同研究的焦点。本文拟在助浮方案计算分析的基础上, 对影响闸底板浮运沉放的各种因素进行综合分析, 并采用层次分析法最终确定最优方案, 以确保工程顺利实施。

1 施工条件

闸底板为预制薄壳沉箱结构, 尺寸为 $99\text{ m} \times 14\text{ m} \times 6.35\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。沉箱由纵隔板与横隔板分隔成 135 个小空箱, 底板总质量约 5 823 t, 闸门 (约 474 t) 及底轴 (约 600 t) 安装后浮运总质量约 6 897 t。由于闸门、底轴已经安装在闸底板上, 同时闸底板本身结构的不对称, 导致浮运存在偏心问题, 因此需设置助浮措施。

闸底板助浮方案既要考虑浮运期间的浮运稳定, 还要考虑苏州河河口吃水深度和安全净空问题, 以及助浮措施对沉放的可能性。底板预制确定在外高桥造船基地, 所以底板浮运需要考虑长江口的水文条件和风浪因素。在黄浦江内浮运则主要考虑航

运的影响, 可以通过海事部门引航解决问题。在苏州河河口则要考虑黄浦江及苏州河的水文条件和河底泥面高程, 以保证足够吃水深度和安全净空。闸底板浮运考虑在大潮期间及局部河道疏浚后进行。根据施工计划, 初步确定闸底板浮运日期, 预报潮位过程表明, 高潮位 3.0 m 以上潮位历时仅 2.7 h, 所以供就位、沉放的时间非常短。

浮运疏浚的河底高程须根据原防汛墙结构安全、防冲护坦施工需要和闸底板浮运吃水深度确定。原防汛墙在本次潜水钢板桩围护后, 墙前滩面可以疏浚至 -3.5 m 。防冲护坦结构施工, 需要将河床疏浚至 -3.5 m 高程。另外, 考虑闸底板与河道泥面间安全净空 0.5 m, 则底板浮运时最大的吃水深度可以为 $5.5 \sim 6.0\text{ m}$ 。

闸底板沉放主要考虑闸底板浮运至现场后如何不拆除或少拆除助浮设施, 尽快在较短的时间内, 确保底板平稳沉放就位而不影响闸底板结构和已经实施的其他结构。初步考虑利用既有的吴淞路闸桥 (只能单向挡潮) 涨潮期关闭水闸, 短时间形成静水条件, 并考虑在闸墩上底板上下游设置限位措施, 以保证底板顺利沉放。

2 助浮方案

2.1 助浮计算

根据结构尺寸计算结构形心如图 1 所示。由于

闸底板不对称性和底轴提供浮力问题,随着闸底板吃水深度的变化,闸底板偏心矩在不断变化,如图 2 所示。当闸底板吃水 4.4 m 时,浮运偏心矩为 47057.4 kN·m;当闸底板吃水 5.0 m 时,浮运偏心矩为 38204 kN·m;当闸底板吃水 5.5 m 时,浮运偏心矩为 29980 kN·m;当闸底板吃水 6.25 m 时,浮运偏心矩为 19010 kN·m。

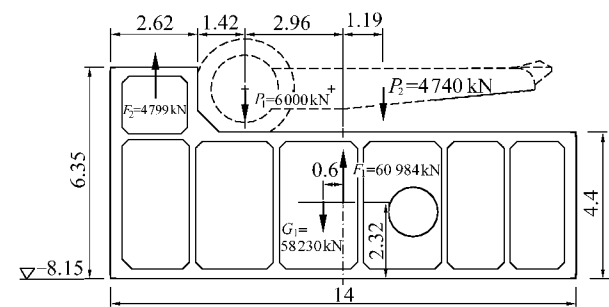


图 1 闸底板结构及形心、浮心位置示意图(单位: m)

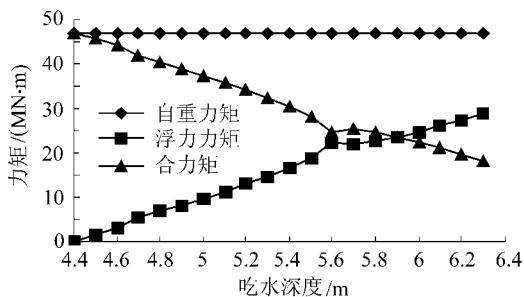


图 2 闸底板偏心矩与吃水深度变化曲线

助浮计算结果表明:当闸底板吃水 4.4 m 时,浮力远比结构重力小,且偏心矩较大,所以必须采用助浮设施。当闸底板吃水 6.25 m 时,浮力与结构重力基本持平,且浮运偏心矩小。综合比较,浮运应采用较大的吃水深度解决浮力与偏心问题,从而减小助浮设备,同时确保闸底板安全浮运与沉放。

2.2 助浮方案

由上述计算可以看出,闸底板与闸门安装后重力与浮力基本相当,且存在偏心问题。为保持浮运、沉放安全必须考虑助浮措施。设计初步考虑的助浮方案有以下 5 种:

a. 方案一。在闸底板下游及两端用钢板(10 mm 厚,1.5 m 高)加高,增加浮力,同时在闸底板外侧空箱注水或在闸底板顶下游侧增加配重,达到闸底板平衡,如图 3 所示。为保证底板水平,由于底板下游最外侧一仓注水总重为 5676 kN,所以必须另加附重 G' 。经计算,附重 $G' = 1871$ kN,底板吃水深度为 5.53 m,浮运能基本满足要求。此方案要求闸底板的下游侧最外仓必须与其他仓隔断,且其他仓的进水孔、透气孔在浮运及沉放时必须封闭。为防止闸底板突沉,沉放时加载进水孔位于闸底板顶部,

即钢板加高部分进水,消除干舷。

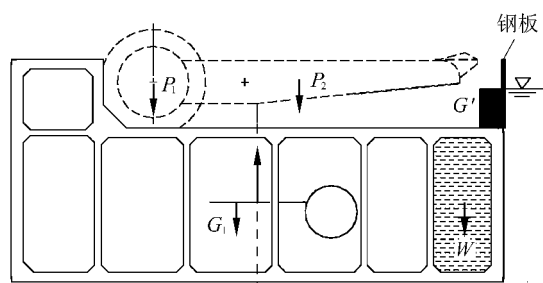


图 3 钢板加高加固剖面示意图

b. 方案二。在闸底板上游侧用钢板及桁架焊接助浮浮箱,增加浮力,同时满足偏心要求。浮箱初步考虑长 80 m,水平宽 4.0 m,高度根据平衡确定,考虑浮箱结构重力系数为 0.1 计算,如图 4 所示。经计算,本方案的闸底板浮运吃水深度为 4.60 m,所以需在闸底板下游侧顶部加部分干舷高。闸底板就位以后,为不影响浮箱对闸底板永久结构的受力,助浮浮箱需水下割除。

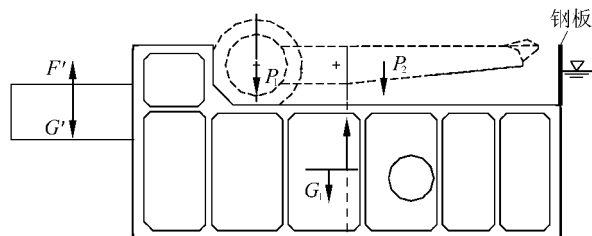


图 4 浮箱助浮方案示意图

c. 方案三。综合综合考虑方案一与二的优缺点,同时考虑闸底板下游外侧空箱注水增加配重和上游侧采用助浮浮箱,以保证闸底板平衡。初步确定助浮浮箱尺寸为 3.0 m × 1.5 m × 80 m,如图 5 所示。经计算,下游外侧空箱注水高度为 2.23 m,底板吃水深度为 5.24 m。浮运、沉放施工同上,沉放就位后,干舷及浮箱也应水下割除。

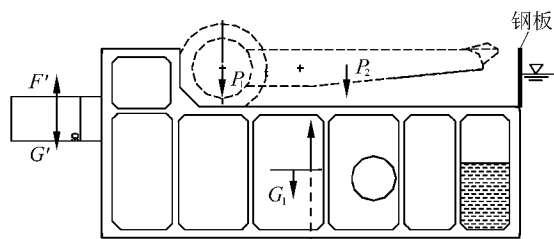


图 5 浮箱助浮 + 压仓水方案示意图

d. 方案四。在方案一基础上,用钢盖板将上部闸门和底轴等封闭,形成一个封闭式空箱,经计算,由于加钢盖板,浮运总重增加,底板吃水深度增加为 5.50 m。

e. 方案五。参照外环线沉管隧道浮运方案,在闸底板上下游各绑扎一条方驳船,方驳船上架立横向联系钢管,同时提供助浮浮力,如图 6 所示。闸底板通过电动或手动葫芦由铁链绑吊在钢管上,钢管数量

根据计算确定,沉放时放松铁链并逐步加水,使底板匀速下沉。为减轻重量和减少偏心,可以考虑吃水深度 5.5 m,由此计算两侧方驳船的承载力。理论上,下游侧方驳船的承载力为零,上游侧方驳船分担垂直力,实际上两侧方驳船的承载力会随着吃水深度变化而自行调节达到平衡。下沉过程中,首先在下游侧注水,随着底板下沉,偏心越来越小,上下游侧的方驳船的承载力差逐渐减小,所提供的力也越来越小。

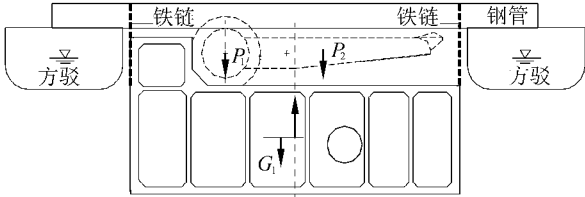


图 6 方驳船绑拖方案剖面示意图

3 方案评价与确定

3.1 优缺点比较

各方案均有优缺点,方案一优点是附加的荷载量小,水下割除量小,不影响其他结构工程,缺点是下沉过程控制困难;方案二优点是吃水深度浅,下沉过程控制较容易,再次上浮容易;缺点是助浮浮箱体积大,水下割除工程量大,防渗体结构需作调整,需验算闸底板的结构强度;方案三综合了方案一与二的优缺点;方案四优点是浮运沉放容易,风险小,缺点是钢材用量大,吃水较深;方案五优点是受力可以人为控制,无水下工程量,闸底板就位后可以调节位置,且再次上浮容易,工期短,经济。

3.2 层次分析法比较

层次分析法(AHP,the analytical process)是经济学和管理学常用方法,可以有效地将主观与客观因素结合起来,有效地分析各因素的影响。按照目标层、准则层和方案层 3 个层次构造递阶层次结构模型,如图 7 所示。

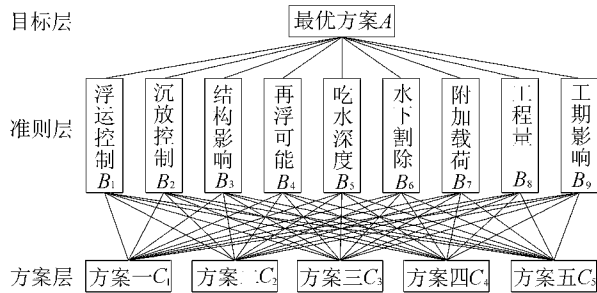


图 7 闸底板助浮沉放方案风险层次分析结构示意图

为减少主观因素影响,将同层次的各项指标对上一层次各指标的相对重要性进行比较,通过引入合适的数值标度,形成判断矩阵。判断矩阵的指标反映了各因素的相对重要性。假设 A 层次中指标

A_k 与下一层次中指标 $B_1, B_2, \dots, B_m$ 有联系,用 B_{ij} 表示对于 A_k 而言 B_i 与 B_j 的相对重要性;海一 B_i 又与 $C_1, \dots, C_n$ 有联系,用 C_{ij} 表示对于 B_i 而言 C_i 与 C_j 的相对重要性。 B_{ij}, C_{ij} 采用 1~9 比率标度法(见表 1),判断矩阵应满足式(1)。因素 i 与因素 j 比较判断得 U_{ij} ,因素 j 与因素 i 比较判断得 $U_{ji} = 1/U_{ij}$ 。

$$\begin{cases} U_{ij} = 1 \\ U_{ij} = 1/U_{ji} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

表 1 判断矩阵的标度及其含义

标度 (B_{ij} 赋值)	含 义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素很重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极其重要
1/3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微不重要
1/5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显不重要
1/7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素很不重要
1/9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极其不重要
2,4,6,8,1/2,1/4,1/6,1/8	表示上述两相邻判断的中值

根据助浮方案选择专家评审和咨询结果,整理得到助浮方案比选中需考虑因素的比较判断矩阵 A-B(式 2)和 B-C(式 3~11)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/4 & 1/5 & 1/6 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/8 & 1/7 \\ 4 & 3 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ 5 & 8 & 4 & 1 & 3 \\ 6 & 7 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/4 & 1/6 & 1/7 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/6 & 1/8 \\ 4 & 2 & 1 & 1/7 & 1/8 \\ 6 & 6 & 7 & 1 & 1/2 \\ 7 & 8 & 8 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B_3 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 1/3 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/4 & 1/3 & 1/4 \\ 2 & 4 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 1/2 \\ 5 & 4 & 4 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$B_4 = \begin{vmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/5 & 1/7 \\ 2 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 5 & 3 & 3 & 1 & 1/2 \\ 7 & 4 & 4 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$B_5 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 2 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$B_6 = \begin{vmatrix} 1 & 4 & 3 & 5 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 2 & 1 & 2 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 1/4 \\ 2 & 3 & 3 & 4 & 1 \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$B_7 = \begin{vmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$B_8 = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$B_9 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (11)$$

经采用方根法计算判断矩阵的特征根和特征向量^[2],计算所有元素对上一层次对应元素影响程度和重要性排序,并进行一致性检验。各影响因素的权重总排序为 $W = (0.287, 0.243, 0.158, 0.109, 0.075, 0.051, 0.035, 0.025, 0.018)^T$, $A-B$ 矩阵一致性比率 CR 为 0.033, $B-C$ 矩阵的一致性比率见表 2。由表 2 可见,各矩阵均具有较高的一致性,也验证了权数分配的合理性。

通过计算,得出各助浮方案的权重总排序为 $W = (0.101, 0.076, 0.136, 0.309, 0.379)^T$,表明了方案四与方案五具有较大优势。

表 2 $B-C$ 层次单排序及一致性检验					
方案	$B-C$ 权重 W_i				
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
C_1	0.060	0.052	0.092	0.057	0.184
C_2	0.043	0.044	0.063	0.106	0.160
C_3	0.137	0.085	0.145	0.106	0.211
C_4	0.471	0.330	0.265	0.283	0.097
C_5	0.289	0.489	0.435	0.448	0.347
一致性比率 CR	0.060	0.087	0.057	0.005	0.015

方案	$B-C$ 权重 W_i			
	B_6	B_7	B_8	B_9
C_1	0.319	0.125	0.424	0.329
C_2	0.086	0.250	0.120	0.165
C_3	0.138	0.250	0.227	0.217
C_4	0.077	0.125	0.120	0.125
C_5	0.380	0.250	0.109	0.165
一致性比率 CR	0.030	0.000	0.007	0.030

注:一致性比率 CR 小于 0.1 即为层次排序具有满意的一致性。

4 结 语

苏州河河口水闸施工环境条件要求工程采用预制拼装结构形式,几乎所有构件都在场外预制,现场拼装。单块 100 m 长的水闸底板,在安装闸门和底轴以后,在不对称重量情况下如何助浮、沉放是工程成败的关键,因此闸底板的浮运沉放方案选择是工程参建各方共同关心的问题。通过经验分析、优缺点定性比较,再通过层次分析法确定的方案在经过物理模型的浮运、沉放试验后,结论认为研究结果是可信的。

采用层次分析法得出的最终的排序结果与定性判断吻合,参与初选方案的成员和咨询专家一致认为方案四与方案五各有优缺点,设计单位从安全考虑推荐采用方案五,施工单位从工程量考虑建议采用方案四。最后通过物理模型试验,结果表明采用方案四是可行的,拖航无风险,但吃水较深,需疏浚河床,同时要加强沉放过程的控制。最终工程采用了方案四作为实施方案,并取得成功。

参考文献:

[1] 沈建明. 项目风险管理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
 [2] 赵焕臣,许树伯. 层次分析法 [M]. 北京:科学出版社, 1986.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 熊水斌)

